

การวิเคราะห์ไอเสียเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก Analysis of Flue Gas for Improving Energy Efficiency of a Reheating Furnace

จิตติน แดงเที่ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 218-6590, โทรสาร: (662) 252-2889,

E-mail: fmeectt@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากที่สุดในอันดับต้นๆ และยังเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักเพื่อป้อนวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ เหล็กที่ใช้งานอยู่ทั่วไปนั้นเกิดจากการขึ้นรูปโดยการบั่นเหล็กแท่ง (billet) ผ่านเตาเผาเหล็ก (reheating furnace) ก่อนที่จะถูกส่งไปยังโรงรีดเพื่อขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้วความร้อนที่ให้กับเตาเผาเหล่านี้จะเกิดการสูญเสียในรูปแบบต่างๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตาเผาต่ำ ส่วนหนึ่งของความร้อนสูญเสียเหล่านั้นส่วนหนึ่งมาจากไอเสียที่ออกจากเตาเผา งานวิจัยนี้จึงเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซและอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตา รวมทั้งการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมและจากการตรวจวัด ทั้งนี้เตาเผาของโรงงานตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือเตาเผาแบบ pusher ขนาด 70 ตัน/ชม. ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์สมดุลความร้อนแสดงให้เห็นว่าความร้อนที่ recuperator นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้เพียงร้อยละ 1.5 ซึ่งมีสาเหตุมาจากสองส่วน ส่วนแรกเนื่องจากการเดินเตาส่วนมากเป็นแบบ part load ส่งผลให้ไอเสียจากหัวเผาเข้าสู่เตาเผาที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นความดันในเตาจึงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้และทำให้ damper ของไอเสียต้องปิดลงเพื่อรักษาความดันภายในเตาให้ได้ตามต้องการ ส่งผลให้ไอเสียบางส่วนรั่วออกไปสู่ภายนอกเตาตามช่องเปิดต่างๆ ซึ่งคิดเป็นปริมาณความร้อนเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงถึงประมาณร้อยละ 19 ของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ อยู่ การแก้ไขจะทำให้ได้โดยการเพิ่มสายการผลิตในส่วนของโรงรีดเพื่อหลีกเลี่ยงการเดินเตาแบบ part load ส่วนที่สองคือปริมาณอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่ไอเสียก่อนที่จะเข้าสู่ recuperator จึงทำให้อุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าสู่ recuperator มีค่าลดลงและความร้อนที่จะนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าลดลงเช่นกัน แนวทางการแก้ไขคือการซ่อมรอยรั่วดังกล่าวซึ่งจะทำให้ recuperator สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้มากยิ่งขึ้น เป็นผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้ประมาณร้อยละ 4 ของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้

คำหลัก: เตาเผาเหล็ก / ไอเสีย / สมดุลมวลและความร้อน

Abstract

The Thailand steel industry is one of the highest energy-consuming industries, and it is served as a basic industry providing raw materials to the secondary industries. To form the billets into different shapes, they are reheated by a reheating furnace before being fed to the rolling mill. Some parts of the generated heat to the furnace usually turns into heat losses leading to lower furnace efficiency. One of

the major heat losses is a flue gas loss. This research focuses on the analysis of flue gas including its components and flow rate, together with the mass and heat balance analysis from the measuring field data. A reheating furnace in this study is a 70 tonne/hr pusher-type furnace using natural gas as a fuel. The result indicates that the recuperator can recover only 1.5% of combustion heat back to the furnace. The reasons can be categorized into two parts: first, the furnace is operated at a part-load condition all the time. This will cause a low amount of flue gas flowing through burners into the furnace. In order to maintain the furnace pressure at the set point, the exhaust gas damper must be closed all the time. As a result, some part of the flue gas will leak out of the furnace through the openings. Heat loss from this amount of leak flue gas is equivalent to 19% of the fuel consumption. The solution is to avoid the part-load operation by adding more rolling lines. Secondly, there is a leak of ambient air into the flue gas duct along the way from the furnace flue exit to the recuperator. This will cause the temperature of the flue gas dropping rapidly, as well as the amount of recovering heat. The solution is to fix this leakage, resulting in more recovering heat and fuel saving by approximately 4% relative to the fuel consumption.

Keywords: Reheating Furnace/ Flue Gas/ Mass and Heat Balance

1. บทนำ

ในบรรดาอุตสาหกรรมพื้นฐานของประเทศ อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศ สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเป็นวัตถุดิบของ อุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับและอัญมณี อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ นอกจากนี้ อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ายังเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานสูงในลำดับต้นๆ ของประเทศอีกด้วย [1] เตาเผาเหล็ก (reheating furnace) เป็นอุปกรณ์หลักในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าที่ใช้พลังงาน เชื้อเพลิงเพื่อสร้างความร้อนให้แก่เหล็กแท่ง (billet) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ $1,100 - 1,250^{\circ}\text{C}$ ก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้เหล็กมีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการ ในการให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งนั้น จะเป็นการให้ความร้อนโดยตรวจจากเปลวไฟของหัวเผา (burner) ซึ่งจะเป็นการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศและได้อิเสียดออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ในการวิเคราะห์การเผาไหม้นั้นจะสามารถตรวจวัดได้โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบและการไหลของไอเสีย เพื่อจะสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปทำการคำนวณสมดุลมวล

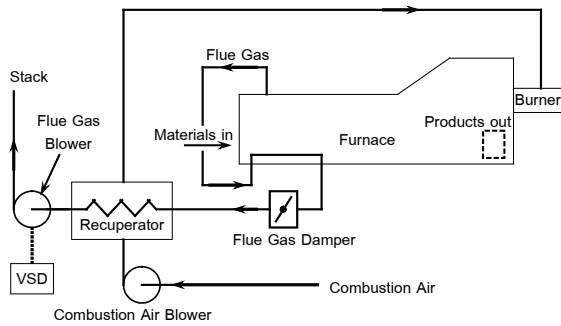
และสมดุลความร้อนของเตาเผาได้ต่อไป ผลของการแสดงสมดุลมวลและสมดุลความร้อนนั้นจะเป็นการจำแนกว่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นได้นำไปใช้ อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ [2] ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ไอเสียทั้งในส่วนขององค์ประกอบของก๊าซ และอัตราไหลที่ได้จากการเผาไหม้ของหัวเผาในเตาเผาเหล็กซึ่งใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ในการวิจัยได้นำเอาเตาเผาเหล็กจากโรงงานแห่งหนึ่งมาเป็นกรณีศึกษาโดยทำการตรวจวัดเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในส่วนถัดไป

2. ลักษณะของเตาเผาเหล็กที่พิจารณา

เตาเผาเหล็กที่นำมาเป็นกรณีศึกษาของงานวิจัยชิ้นนี้นั้นเป็นเตาเผาเหล็กขนาด 70 ตันต่อชั่วโมง และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ตัวเตาเป็นแบบ

pusher โดยมีหัวเผาทั้งหมด 20 หัว แบ่งเป็นหัวเผาในโซน heating 8 หัวและโซน soaking อีก 12 หัว วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นหลักแท่งขนาด 130 x 130 mm ที่มีความยาว 6 หรือ 12 m ขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่จะทำการรีด ลักษณะการทำงานของเตาจะสอดคล้องกับอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU (Time of Use) กล่าวคือเตาจะทำงานแบบปกติในวันธรรมดา 22:00 – 8:50 น. ส่วนวันเสาร์ วันอาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์จะทำงานเต็มวัน ส่วนเวลาที่เหลือจะอุ่นเตาไว้เฉยๆ โดยที่ไม่ทำการรีด ส่วนประกอบต่างๆของเตาเผาเหล็กที่พิจารณาจะแสดงอยู่ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของเตาเผาเหล็กที่พิจารณา

ในการควบคุมการไหลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยังปล่องนั้นจะควบคุมโดยสองส่วน ส่วนแรกคือแฉกเปอร้อไอเสีย (flue gas damper) ซึ่งจะเปิดปิดตามค่าความดันภายในเตา ส่วนที่สองคือระบบปรับความเร็วรอบ (VSD) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลมสำหรับดูดไอเสีย (flue gas blower)

3. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

เนื่องจากก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในสถานะก๊าซ ที่เป็นของผสม ดังนั้นองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติจึงสามารถจำแนกได้ เป็นก๊าซที่ติดไฟได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซอีเทน (C_2H_6) ก๊าซบิวเทน (C_3H_8) เป็นต้น และก๊าซเฉื่อยได้แก่ CO_2 , N_2 เป็นต้น ส่วนผสมของก๊าซธรรมชาตินั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มา ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นนี้ค่าของ ส่วนผสมต่างๆ ในก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะเป็น

ค่าที่ได้จากแหล่งทางด้านชายทะเลฝั่งตะวันออกของประเทศไทย ดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของก๊าซธรรมชาติจากชายทะเลฝั่งตะวันออกโดยเฉลี่ย [3]

| ส่วนผสม | ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร |
|---------------------------|------------------------|
| CH_4 | 75.8 |
| C_2H_6 | 5.7 |
| C_3H_8 | 2.0 |
| C_4H_{10} | 0.9 |
| CO_2 | 13.5 |
| N_2 | 2.1 |

เมื่อนำส่วนผสมของก๊าซธรรมชาติที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ ของก๊าซธรรมชาติซึ่งได้แก่มวลโมเลกุลเฉลี่ย และค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.77 kg/kmol และ 0.890 kg/m³ ตามลำดับ จากนั้นก็ทำการเขียนสมการการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติทางทฤษฎี จะพบว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของก๊าซธรรมชาติ (AF_{stoic}) มีค่าเท่ากับ

$$AF_{\text{stoic}} = 11.82 \frac{\text{kg}_{\text{air}}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} = 8.92 \frac{\text{Nm}^3_{\text{air}}}{\text{Nm}^3_{\text{fuel}}} \quad (1)$$

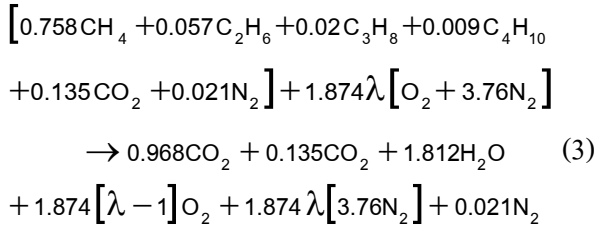
จะเห็นได้ว่าค่า AF_{stoic} ของก๊าซธรรมชาติที่ได้จะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่า AF_{stoic} ของก๊าซธรรมชาติในต่างประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณก๊าซเฉื่อยของก๊าซธรรมชาติ จากชายทะเลฝั่งตะวันออก จะมีค่ารวมกันประมาณร้อยละ 15 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง จากนั้นก็ทำการคำนวณหาความร้อนเชื้อเพลิงสูง (HHV) และค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (LHV) จะได้ว่า

$$HHV = 34.1 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3_{\text{fuel}}}, \quad LHV = 30.8 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3_{\text{fuel}}} \quad (2)$$

4. การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย

ในการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ นั้นโดยมากมักจะสามารรถคำนวณได้จากการตรวจวัดปริมาณสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนในไอเสีย ($\%O_2$) ซึ่ง

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของไอเสีย ซึ่งจะหาได้จาก การเขียนสมการการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ กล่าวคือ



ค่า λ เป็นสัดส่วนที่เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีซึ่งก็คือ

$$\lambda = \frac{\text{AF}_{\text{actual}}}{\text{AF}_{\text{stoic}}} \quad (4)$$

ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วค่า λ จะมีค่ามากกว่า 1 ทั้งนี้เหตุผลเนื่องมาจากการเผาไหม้จริงมีข้อจำกัดด้านเวลาที่ใช้ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจึงต้องเพิ่มอากาศส่วนเกินเข้าไปเพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้แล้วอากาศส่วนเกินยังช่วยลดปัญหาด้านมลภาวะที่เกิดจากก๊าซ CO ในกรณีที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น

จะเห็นได้ว่าพจน์ $1.874[\lambda - 1]\text{O}_2$ ที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ 3 นั้นคือปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมา กับไอเสีย ดังนั้นเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสีย (flue gas analyzer) จะสามารถวัดปริมาณของออกซิเจนที่ออกมา กับไอเสียในรูปของอัตราส่วนเป็นร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (dry basis) หรือก็คือไอเสียจะถูกดูดเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง $\% \text{O}_2$ ที่ตรวจวัดได้กับ λ จะสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\% \text{O}_2 = \frac{1.874(\lambda - 1)}{1.103 + 1.874(\lambda - 1) + (7.046\lambda + 0.021)} \quad (5)$$

ซึ่งเมื่อเขียนสมการใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจะได้ว่า

$$\lambda = \frac{0.540 - 0.153 \left(\frac{\% \text{O}_2}{100} \right)}{0.540 - 2.571 \left(\frac{\% \text{O}_2}{100} \right)} \quad (6)$$

ในกรณีที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ค่า $\% \text{O}_2$ ที่เหมาะสมจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2 ถึง 3 [4] ซึ่งหากแทนค่า $\% \text{O}_2$ ดังกล่าวลงไปในสมการที่ 6 ข้างต้นค่า λ ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 1.10 ถึง 1.16

5. การเก็บข้อมูลและการตรวจวัด

ในการเก็บข้อมูลและการตรวจวัดเพื่อนำข้อมูลไปคำนวณหาสมมูลมวลและสมมูลความร้อนของเตาเผาเหล็กนั้นประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ข้อมูลที่เก็บรวบรวมเพื่อนำไปวิเคราะห์

| ชุดข้อมูล | ค่าที่เก็บ | วิธีการ |
|---------------------------|--|--|
| 1) ข้อมูลการผลิต | <ul style="list-style-type: none"> น้ำหนักเหล็กแท่ง อัตราการผลิต ปริมาณสเกล | <ul style="list-style-type: none"> สอบถามจากทางโรงงาน บันทึกจำนวนเหล็กแท่ง สอบถามจากทางโรงงาน |
| 2) ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง | <ul style="list-style-type: none"> อัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาเผา | <ul style="list-style-type: none"> บันทึกค่าจากห้องควบคุม บันทึกค่าจากห้องควบคุมก่อนเข้าเตาเผา |
| 3) ข้อมูลของไอเสีย | <ul style="list-style-type: none"> อุณหภูมิไอเสียภายในเตาเผา อุณหภูมิไอเสียออกจากเตาเผา ก่อนเข้า recuperator อุณหภูมิไอเสียหลังจากผ่าน recuperator ความเร็วของไอเสียที่ออกจากเตาเผา องค์ประกอบของไอเสียที่ออกจากเตาเผา องค์ประกอบของไอเสียก่อนเข้า recuperator องค์ประกอบของไอเสียหลังจากผ่าน recuperator | <ul style="list-style-type: none"> บันทึกค่าจากห้องควบคุม ตรวจวัดโดยใช้ thermocouple ตรวจวัดโดยใช้ thermocouple ตรวจวัดโดยใช้ pitot tube ตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย ตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย ตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย |

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| 4) ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ | <ul style="list-style-type: none"> อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิของอากาศหลังจากผ่าน recuperator | <ul style="list-style-type: none"> ตรวจวัดโดยใช้ thermocouple บันทึกค่าจากห้องควบคุม |
| 5) มิติของส่วนต่างๆ ของเตาเผา | <ul style="list-style-type: none"> ขนาดของส่วนต่างๆ เช่น ช่องเปิดท่อไอเสีย ฯลฯ | <ul style="list-style-type: none"> อ่านจากแบบของเตาเผา |
| 6) ข้อมูลของอุณหภูมิผิวเตาเผา | <ul style="list-style-type: none"> อุณหภูมิที่ผิวเตาเผาโดยรอบ | <ul style="list-style-type: none"> ตรวจวัดโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน |

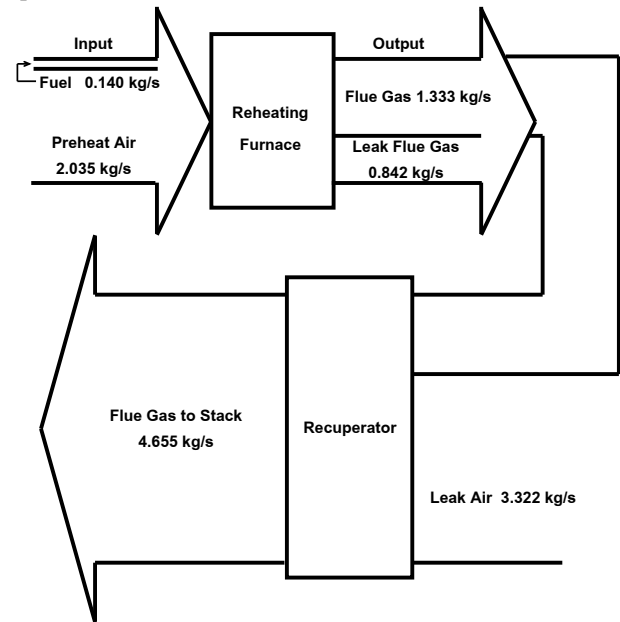
6. การคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อน
 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมและตรวจวัดมาใช้ในการคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาซึ่งมีรายละเอียดตามเอกสารอ้างอิง [5] และผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

6.1 สมดุลมวล

ในการคำนวณสมดุลมวลนั้นมีข้อสมมติฐานคือเตาเผาอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) จากสมการที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการตรวจวัดค่า % O₂ จากไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก็สามารถนำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการที่ 6 เพื่อหาอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติได้และเมื่อนำมาประกอบกับอัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ตรวจวัดมาได้อีกก็สามารถทราบอัตราไหลของอากาศที่จริงได้เช่นกัน

นอกจากนี้เนื่องจากค่าความดันภายในเตาเผาถูกควบคุมให้มีค่าเป็นบวก ดังนั้นไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะรั่วออกจากเตาเผาสู่อากาศภายนอกตามช่องเปิดต่างๆ ดังนั้นการตรวจวัดอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาจึงมีความจำเป็นเพื่อนำไปหาอัตราไหลของไอเสียที่รั่วออกจากเตาเผา นอกจากนี้จากการตรวจวัดค่า %O₂ ตรงตำแหน่งที่ไอเสียออกจากเตาเผาในทันทีและตรงตำแหน่งก่อนเข้า recuperator จะพบว่าค่า %O₂ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลดังกล่าวเป็นการบ่งชี้ถึงการรั่วของอากาศภายนอกเข้าสู่ท่อไอเสียซึ่งปริมาณ %O₂ ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะสามารถนำไปคำนวณปริมาณอากาศที่รั่วเข้าสู่ท่อไอเสียได้ โดย

สรุปแล้วสมดุลมวลของเตาเผาจะสามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

6.2 สมดุลความร้อน

ในการคำนวณสมดุลความร้อนนั้น เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาเผาถูกควบคุมไว้ให้มีค่าคงที่โดยตลอด ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานให้เตาเผาอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) นั่นคือไม่มีพลังงานความร้อนสะสมอยู่ภายในตัวเตาเผา รายละเอียดของความร้อนที่เข้าสู่และออกจากเตาเผาเหล็กคือ

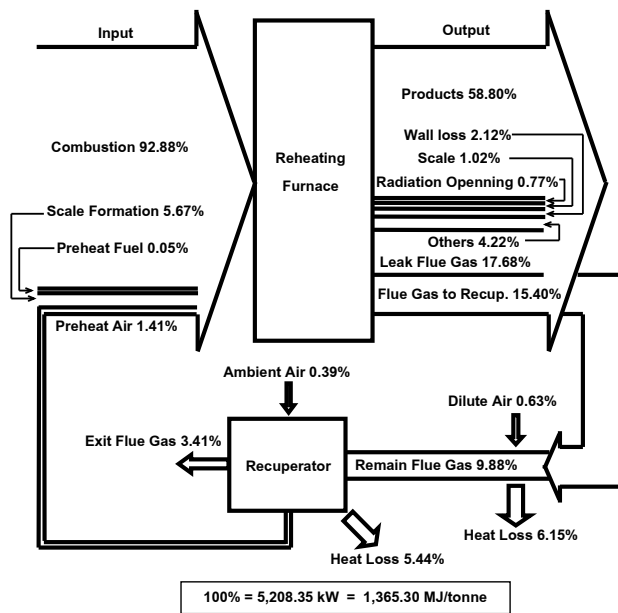
- พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก
 - 1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
 - 2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า
 - 3) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล
 - 4) ความร้อนจากการ preheat อากาศที่ recuperator
- พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก
 - 1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
 - 2) ความร้อนจากไอเสียที่รั่วออกจากเตาเผา
 - 3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
 - 4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา
 - 5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เช่น หลังกา พื้น เป็นต้น
 - 6) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี

7) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยัง recuperator

สำหรับในส่วนของ recuperator ก็จะมีการตั้งสมมติฐานแบบเดียวกับเตาเผาเหล็กนั่นคือ recuperator อยู่ในสภาวะคงที่ รายละเอียดของความร้อนที่เข้าสู่และออกจาก recuperator คือ

- พลังงานความร้อนเข้าสู่ recuperator
 - 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า
 - 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า
- พลังงานความร้อนออกจาก recuperator
 - 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาออก
 - 2) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาออก
 - 3) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

เมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กและ recuperator จากข้อมูลที่ได้ จะสามารถได้ ในรูปของ Sankey Diagram ดังที่ปรากฏในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

7. การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางปรับปรุง

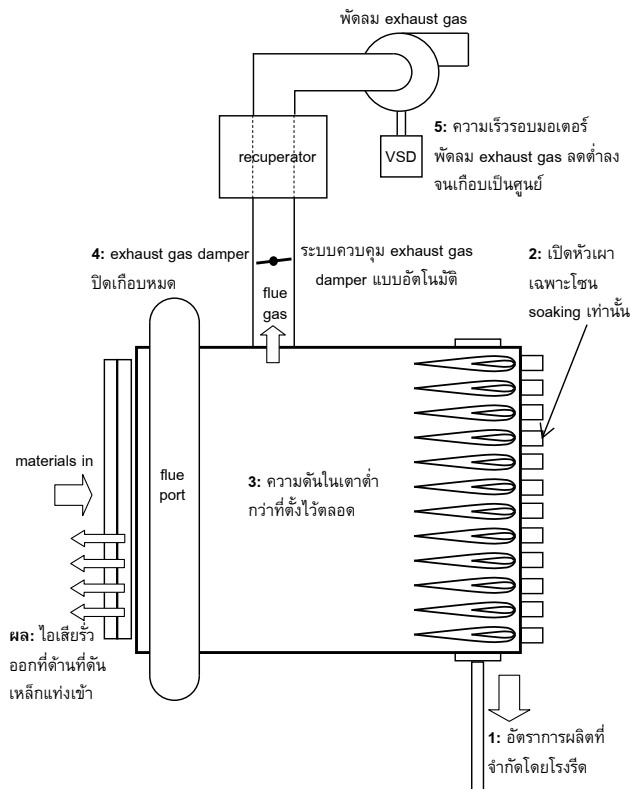
หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาไปแล้ว ลำดับถัดไปก็จะเป็นการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเตาเผา (furnace

efficiency) ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนเป็นร้อยละระหว่างความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็กต่อความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ เมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพของเตาเผาที่ทำการศึกษาอยู่โดยใช้ข้อมูลจาก Sankey diagram จะพบว่าค่าความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็กมีค่า 3,062 kW ในขณะที่ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่า 4,837 kW ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของเตาเผาที่ได้จึงมีค่าประมาณร้อยละ 63 ซึ่งเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพของเตาเผาแบบ pusher ขนาดต่างๆ [6] พบว่าค่าที่ได้ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดเล็กน้อย เมื่อพิจารณา Sankey diagram ในรูปที่ 3 จะพบว่าประสิทธิภาพของเตาเผาไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนดนั้นสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากสัดส่วนของความร้อนของอากาศที่ผ่าน recuperator แล้วนำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีค่าต่ำมากคือประมาณร้อยละ 1.4 ซึ่งโดยทั่วไปค่าดังกล่าวควรจะมีค่าประมาณร้อยละ 10-20 ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นกับเตาเผาที่ใช้ศึกษานี้ น่าจะมาจากการนำความร้อนกลับมาใช้ของ recuperator ซึ่งสาเหตุนี้มีความเป็นไปได้ที่จะมาจากสองส่วนด้วยกัน ดังต่อไปนี้

7.1 ปัญหาจากการรั่วของไอเสียออกจากเตาเผา

เมื่อพิจารณาสมดุลมวลในรูปที่ 2 จะพบว่าอัตราไหลเชิงมวลของไอเสียที่รั่วออกจากเตาเผานั้นมีค่าประมาณร้อยละ 39 ของปริมาณไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมด ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง จากการวิเคราะห์ที่มาของปัญหาดังกล่าวโดยสอบถามข้อมูลจากทางโรงงานพบว่า ในขณะที่ระบบควบคุมความดันในเตาเผาซึ่งเป็นแบบอัตโนมัติพยายามรักษาความดันภายในเตาเผาให้ได้ 0.5 mm H₂O ตามที่ตั้งค่าไว้ ซึ่งก็เป็นค่ามาตรฐานของเตาเผาเหล็กโดยทั่วไป [7] เนื่องจากเตาเผาที่มีขนาดการผลิตเท่ากับ 70 ตันต่อชั่วโมง แต่มีการผลิตจริงแค่ประมาณ 20 ถึง 40 ตันต่อชั่วโมง ดังนั้นเพื่อให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าเพียงพอกับปริมาณเหล็กที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา จึงจำเป็นต้องลดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงลงโดยการปิดหัวเผาในโซน heating ทั้งหมด 8 หัว และใช้งานเฉพาะหัวเผาในโซน soaking จำนวน 12 หัวเท่านั้น

เมื่อปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาอยู่ในอัตราที่ต่ำ ค่าความดันภายในเตาเผาจึงลดลง เพื่อรักษาระดับความดันให้ได้ตามที่ตั้งไว้ exhaust gas damper จึงปิดลงเกือบสนิทส่งผลให้ระบบปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ exhaust gas blower จึงต้องลดความเร็วรอบของมอเตอร์ลงเพื่อลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ในการเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจาก exhaust gas damper อย่างไรก็ตามระบบปรับความเร็วรอบไม่สามารถลดความเร็วของมอเตอร์ให้ลงเป็นศูนย์ได้เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการระบายความร้อนของมอเตอร์ ดังนั้นจึงระบบปรับความเร็วรอบจึงรักษาความเร็วรอบไว้ที่ 150 rpm ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้และทำให้ไอเสียบางส่วนจึงดูดผ่าน exhaust gas damper ออกไปยังปล่องได้ รูปที่ 4 เป็นรูปที่แสดงถึงสาเหตุของการรั่วของไอเสียที่ออกจากเตาเผา



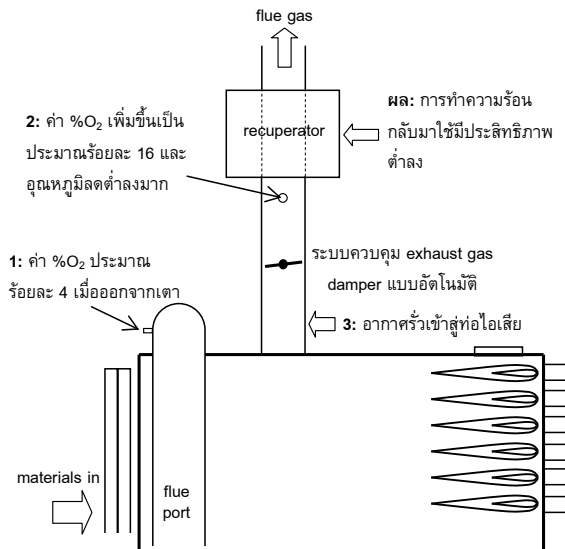
รูปที่ 4 แผนภาพสรุปสาเหตุของการรั่วของไอเสียที่ออกจากเตาเผา

สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาที่เมื่อพิจารณา Sankey diagram ในรูปที่ 3 พบว่าความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียที่รั่วออกจากเตาเผามีค่าถึงประมาณร้อยละ 18 ซึ่งคิดเทียบเท่ากับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปถึงร้อยละ 19 ของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ การแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นจะทำได้โดยการเพิ่มอัตราการผลิตซึ่งปัจจุบันถูกจำกัดไว้ที่ส่วนของการรีดเหล็ก ซึ่งสามารถทำได้สองวิธีคือ (1) ปรับปรุงกระบวนการรีดให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นโดยเน้นที่การบำรุงรักษาเป็นหลัก และ (2) เพิ่มสายการรีดเหล็กให้มากขึ้น ซึ่งวิธีนี้จะเป็นแผนการปรับปรุงในระยะยาวของทางโรงงาน

7.2 ปัญหาจากการรั่วของอากาศภายนอกเข้าผสมกับไอเสียที่ท่อไอเสีย

จากการพิจารณาสมดุลมวลในรูปที่ 2 จะพบว่าอากาศจากภายนอกบางส่วนรั่วเข้าไปผสมกับไอเสียที่กำลังเดินทางออกจากเตาเผาไปสู่ recuperator ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่า % O₂ ที่เพิ่มขึ้นจากประมาณร้อยละ 4 เมื่อออกจากเตาเผาไปเป็นร้อยละ 16 ก่อนเข้า recuperator ประกอบกับแรงดูดจาก exhaust gas blower ที่ยังคงหมุนอยู่ทำให้ความดันภายในท่อไอเสียมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จึงมีความเป็นไปได้ที่เกิดการรั่วไหลของอากาศภายนอกเข้าไปผสมกับไอเสีย ณ จุดที่อยู่ระหว่างทางออกของเตาเผาจนถึงก่อนเข้า recuperator จากการประเมินพบว่าผลของการรั่วดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของไอเสียลดลงจากประมาณ 550 °C เมื่อออกจากเตาเผาไปเป็นประมาณ 200 °C หลังจากการผสม และเหลืออุณหภูมิประมาณ 130 °C ก่อนเข้า recuperator ผลดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของไอเสียมีค่าลดลงอย่างมากและทำให้ปริมาณความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่จาก recuperator มีค่าลดลงเช่นกัน จากการตรวจวัดพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้หลังจากผ่านการอุ่นด้วย recuperator มีค่าประมาณ 60 °C ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับเตาเผาเหล็กโดยทั่วไปที่ recuperator สามารถใช้งานได้อย่างปกติซึ่งจะมีค่าของอุณหภูมิของอากาศหลังจากผ่านการอุ่นด้วย recuperator อยู่ที่ประมาณ 200 ถึง

400°C รูปที่ 5 เป็นรูปที่แสดงถึงสาเหตุของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าไปผสมกับไอเสียที่ท่อไอเสีย



รูปที่ 5 แผนภาพสรุปสาเหตุของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าไปผสมกับไอเสียที่ท่อไอเสีย

สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาที่นั่นเมื่อพิจารณา Sankey diagram ในรูปที่ 3 พบว่าปริมาณความร้อนของอากาศที่ผ่าน recuperator แล้วนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าประมาณร้อยละ 1.4 ซึ่งเมื่อทำการสอบถามจากทางโรงงานจึงได้ข้อมูลว่าในช่วงที่เริ่มเดินเตาหลังจากเปิดโรงงานใหม่ๆ ค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้หลังจากผ่านการอุ่นด้วย recuperator มีค่าประมาณ 150°C ซึ่งหากนำข้อมูลดังกล่าวไปประเมินว่าในช่วงดังกล่าวยังไม่มีการรั่วของอากาศเข้าสู่ท่อไอเสียขึ้น ดังนั้นจากการคำนวณประเมินค่าพลังงานที่จะประหยัดได้ หากทำการซ่อมแซมในส่วนของอากาศที่รั่วดังกล่าวจะทำให้ recuperator นำความร้อนกลับมาได้เพิ่มขึ้นประมาณ 186 kW ซึ่งสามารถเทียบได้เป็นอัตราไหลของเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ประมาณ 5.38 g/s หรือ 26.8 Nm³/hr อัตราไหลของเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 3.85 เมื่อเทียบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงในสภาวะการทำงานปกติ

8. สรุป

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เป็นการนำเอาเตาเผาเหล็กจากโรงงานแห่งหนึ่งมาเป็นกรณีศึกษาเพื่อทำการวิเคราะห์ไอเสียทั้งในส่วนขององค์ประกอบของก๊าซและอัตราไหลที่ได้จากการเผาไหม้ของหัวเผา จากการศึกษาพบว่าปริมาณไอเสียที่ไหลผ่าน recuperator มีอัตราไหลต่ำเกินไปเนื่องจากการเดินเตาแบบ part load เป็นส่วนมาก ทำให้ exhaust gas damper ต้องปิดลงเกือบสนิท ส่งผลให้ไอเสียรั่วออกจากเตาเผาทางด้านที่เดินเหล็กแห้งเข้าคิดเป็นปริมาณความร้อนที่เทียบเท่ากับเชื้อเพลิงประมาณร้อยละ 19 ของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยที่การแก้ไขจะทำให้ได้โดยการขยายการผลิตในส่วน of โรงรีด นอกจากนี้ อุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้าสู่ recuperator ก็มีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากการรั่วของอากาศภายนอกเข้าสู่ท่อไอเสีย ซึ่งการแก้ไขโดยการซ่อมแซมรอยรั่วดังกล่าวจะสามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้ประมาณ 5.4 g/s หรือ 26.8 Nm³/hr คิดเป็นร้อยละ 4 ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงในสภาวะการทำงานปกติ

9. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยพลังสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (2549). รายงานฉบับสุดท้าย, โครงการการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (SEC), (โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก) เสนอต่อกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- [2] Janjai, W.H., Chena, Y.C. and Chung, J.L. Liu, (2005). Analysis on energy consumption and performance of reheating furnace in a hot strip mill, *International Communications in*

Heat and Mass transfer, vol. 32(5), pp. 695-706.

- [3] ยศพงษ์ ลอยนวล, สำเร้ง จักรใจ, สมชาย จันท์ชานา และ นุวงศ์ ชลคุป (2550). การวิเคราะห์ส่วนประกอบที่แปรผันของก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ที่ใช้ในประเทศไทย , *การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3*, โรงแรมไบฮอกสกาย จังหวัดกรุงเทพฯ.
- [4] U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy (2009). *Energy Tips*, available on line at http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/et_check_burner.pdf
- [5] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) & Ministry of International Trade and Industry (MITI) Japan (1992). *Handy Manual: Iron and Steel Industry, Seminar of Energy Conservation in Iron and Steel Industry*, pp. 20-28.
- [6] National Productivity Council of India (2006). *National Certificate Examination for Energy Managers and Energy Auditors, Guide Book 4: Energy Performance Assessment for Equipment and Utility systems, Chapter 2: Furnaces*, pp. 43.
- [7] Trinks, W et al (2004). *Industrial Furnaces (6th edition)*, John Wiley & Sons, New York, pp. 272.